



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

**ÚSTAV MATERIÁLOVÝCH VĚD A INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

INSTITUTE OF MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING

# **LOMOVÁ HOUŽEVNATOST KOVOVÝCH MATERIÁLŮ A JEJÍ ZKOUŠENÍ**

FRACTURE TOUGHNESS OF METALLIC MATERIALS AND ITS TESTING

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**LUKÁŠ KOSEK**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**Ing. KAREL NĚMEC, Ph.D.**

BRNO 2011



Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav materiálových věd a inženýrství

Akademický rok: 2010/2011

## **ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

student(ka): Lukáš Kosek

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

### **Lomová houževnatost kovových materiálů a její zkoušení**

v anglickém jazyce:

### **Fracture Toughness of Metallic Materials and its Testing**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Shrnutí poznatků o lomové houževnatosti kovových materiálů a definice základů lineární elastické lomové mechaniky. Popis zkoušení lomové houževnatosti za podmínek rovinné deformace.

Cíle bakalářské práce:

- 1) Definice lomové houževnatosti materiálu
- 2) Definice základů lineární elastické lomové mechaniky
- 3) Popis měření lomové houževnatosti za podmínek rovinné deformace
- 4) Formulace závěrů z práce vyplývajících

Seznam odborné literatury:

- 1) Ptáček, L. a kol.: Nauka o materiálu I. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2003. 516 s. ISBN: 80-7204-283-1
- 2) Veles, P. : Mechanické vlastnosti a skúšanie kovov: celoštátna vysokoškolská učebnica pre hutnícke a strojárské fakulty vysokých škôl. 2. vyd. Bratislava: Alfa, 1989. 401 s.
- 3) Kunz, J.: Aplikovaná lomová mechanika. 4. přeprac. vyd. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2005, 1991. 272 s. ISBN: 80-01-03306-6
- 4) Puškár, A.: Medzné stavy materiálov a súčastí: celoštátna vysokoškolská príručka pre strojárské a stavebné fakulty vysokých škôl. 1. vyd. Bratislava: Veda, 1989. 299 s.
- 5) ČSN EN ISO 12737. Kovové materiály - Stanovení lomové houževnatosti při rovinné deformaci. Praha: ČNI, 2006. 20 s.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Karel Němec, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2010/2011.

V Brně, dne 2.11.2010

L.S.

---

prof. Ing. Ivo Dlouhý, CSc.  
Ředitel ústavu

---

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.  
Děkan fakulty

**Abstrakt:**

Cílem této práce je seznámení se s teoretickými základy lomové houževnatosti kovových materiálů a popisem jejího měření za podmínek rovinné deformace. V práci jsou uvedeny základní pojmy lineární elastické lomové mechaniky, kterými je možno popsat chování materiálu při lomu součásti s trhlinou. Je definován faktor intenzity napětí a popsány hlavní prvky ovlivňující lomovou houževnatost. Dále práce popisuje jednotlivé zkušební metody, zkušební tělesa a zařízení. V závěru shrnuje platnost a použití lineární elastické lomové mechaniky.

**Abstract:**

The purpose of the work is to introduce the basic of the fracture toughness of metallic materials and its measuring under the conditions of the plane strain. There are shown essential concepts of the linear elastic fracture mechanics, which is used for the description of the material behavior at fracture of the material with a crack. It defines stress intensity factor and describes the main elements influencing the fracture toughness. Furthermore, the work contains the particular testing methods, specimens and testing equipments. In the conclusion it recapitulates the availability and the application of the linear elastic fracture mechanics.

**Klíčová slova:**

Lomová houževnatost, rovinná deformace, faktor intenzity napětí, trhlina, lineární elastická lomová mechanika, zkušební těleso

**Keywords:**

Fracture toughness, plane strain, stress intensity factor, crack, linear elastic fracture mechanics, specimen



**Bibliografická citace:**

KOSEK, L. *Lomová houževnatost kovových materiálů a její zkoušení*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 41 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Karel Němec, Ph.D..





**Prohlášení:**

Tímto prohlašuji, že předkládanou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího bakalářské práce.

V Brně dne 26.5.2011

.....

Lukáš Kosek



**Poděkování:**

Na tomto místě bych rád poděkoval Ing. Karlu Němcovi, Ph.D. za jeho vřelý přístup, náměty, cenné rady a vedení mojí bakalářské práce.



**Obsah:**

1. Úvod.....	15
2. Lomová houževnatost .....	17
2.1. Definice lomové houževnatosti a její význam .....	17
2.2. Rozdělení lomové mechaniky .....	18
3. Definice základů lineární elastické lomové mechaniky .....	19
3.1. Napjatost na čele defektu .....	19
3.2. Výpočet pevnosti součásti s trhlinou .....	20
3.3. Griffithovo energetické kritérium.....	21
3.4. Hnací síla trhliny .....	22
3.5. Vznik stabilního a nestabilního lomu .....	23
3.6. Faktor intenzity napětí .....	24
3.7. Velikost a tvar plastické zóny na čele trhliny .....	25
3.8. Faktory ovlivňující lomovou houževnatost.....	27
3.9. Platnost lineární elastické lomové mechaniky .....	29
4. Popis měření lomové houževnatosti za podmínek rovinné deformace .....	30
4.1. Rozdělení zkoušek lomové houževnatosti .....	30
4.2. Velikost a tvar zkušebních těles .....	30
4.3. Zkušební těleso pro zkoušku ohybem.....	31
4.4. Zkušební těleso pro zkoušku excentrickým tahem.....	33
4.5. Zkušební zařízení.....	34
4.6. Výpočet a vyhodnocení zkoušky.....	36
5. Závěr .....	38
6. Seznam použitých symbolů .....	39
7. Použitá literatura .....	40



## 1. Úvod

Mechanické zkoušky kovových materiálů patří dnes neodmyslitelně k hlavním nástrojům pro zjišťování provozní bezpečnosti součástí nebo konstrukcí. Tyto zkoušky jsou závislé na typu daného materiálu a jejich správná volba vede k vhodnému využití výsledků v reálných konstrukcích. V dnešní době se kladou čím dál větší nároky na mechanické vlastnosti materiálů, což vede k vývoji kvalitnějších konstrukcí. Vedle pevnosti, pružnosti, a plasticity patří mezi základní mechanické vlastnosti také houževnatost, o níž pojednává tato práce.

S houževnatostí materiálu se setkáváme v mnohých odvětvích strojírenského či stavebního průmyslu. Máme na mysli především letecký, automobilový a lodní průmysl, dále při konstrukcích mostů, potrubí nebo budov. Stanovování výsledků houževnatosti prošlo nepochybně určitým vývojem a spolu s ním i řadou katastrof, které způsobil nečekaný křehký lom součástí resp. konstrukce.

Na přelomu 19. a 20. století, kdy se objem průmyslové výroby neustále zvyšoval a častá modernizace výrobních procesů začínala klást důraz na kvalitu kovových materiálů, se začaly objevovat první náznaky nepředvídatelných havárií ocelových konstrukcí. Týkalo se to v té době zejména katastrofálních lomů potrubí, nádrží, mostů, lodí či podvozků železničních náprav. Příčinou těchto havárií byla často nedostatečná míra houževnatosti materiálu.

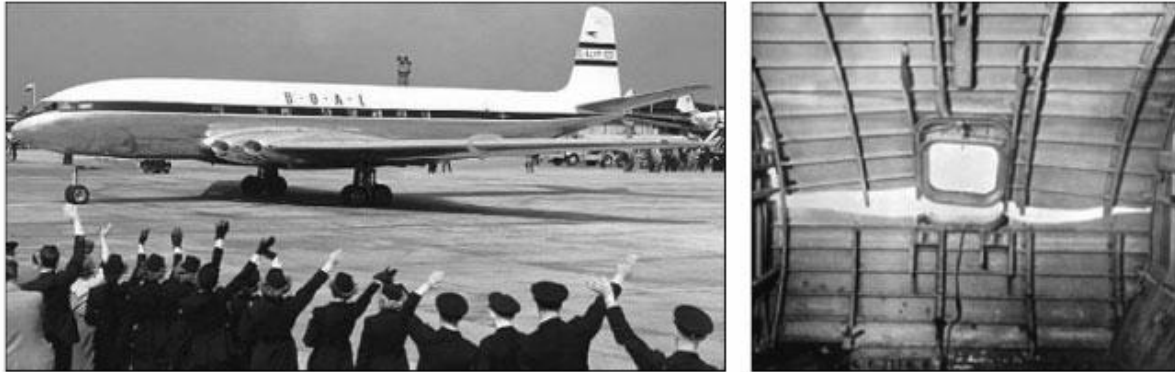


*Obr. 1: Rozlomení lodi typu Liberty [9]*

V meziválečném období, na rozdíl od do té doby obvyklého nýtování, se začala hojně využívat technologie svařování. Ovšem i zde se vyskytovaly další havárie způsobené křehkým lomem v místech svarových spojů konstrukcí, kde docházelo ke koncentraci napětí, zvláště při nízkých teplotách. Vznik lomové mechaniky je úzce spojen s událostmi, které se přihodily v průběhu druhé světové války spojeneckým nákladním lodím typu Liberty. Několik stovek jich utrpělo poškození trhlinami různých velikostí, další se poškodily úplným příčným rozlomením na dvě části. Nejprve byla kladena vina nekvalifikované výrobní síle, avšak analýza svařovaných lodních trupů ukázala, že nebezpečí se skrývalo jinde. Většina těchto lomů vycházela z konstrukčních vrubů či defektů ve svařech a nízkou kvalitou použité oceli. Lomové porušení ocelí tak vzniklo z výrazné koncentrace napětí v daném místě. Aby bylo v budoucnu odstraněno těchto nedostatků, zpřísnil se požadavek na výběr materiálů (především při vývoji kvalitnější jemnozrnné oceli), zavedla se určitá norma pro stanovení

chemického složení oceli pro stavbu lodí, technologie svařování byla zkvalitněna novými metodami svařování a v neposlední řadě bylo zapotřebí využití defektoskopických metod kontroly materiálů [11].

Nepředvídatelné katastrofy způsobené křehkým porušením se začaly dále objevovat nejenom u lodí, ale i u letadel s rozvojem letecké dopravy v 50.letech. V historii leteckých katastrof byly nejznámější havárie proudových dopravních letadel typu Comet. Zjistilo se, že příčinou nehod byla hranatá okénka, u kterých nastala iniciace trhlin v rozích okének následkem opakovaných změn tlaku uvnitř a vně pláště letadla. Trup letadla se tak během letu rozpadl. Podobně vznikaly křehké lomy z existujících defektů v letadlech typu F-111 nebo Boeing 737 v druhé polovině dvacátého století [11].



*Obr. 2: Pohled na dopravní letadlo typu Comet a jeho rozlomení v blízkosti oken [17]*

V dnešní době patří mezi příčiny havárií hlavně lidská nepozornost, nedodržení stávajících předpisů nebo zavádění nových materiálů do praxe. Zabráněním těchto haváriím můžeme jediné zkoušením mechanických vlastností, které charakterizují danou vlastnost materiálu, ale závisí také na tvaru zkušebního tělesa a podmínkách namáhání.



## 2. Lomová houževnatost

### 2.1. Definice lomové houževnatosti a její význam

Lomovou houževnatostí rozumíme odpor materiálu vůči vzniku a následnému růstu trhliny. Vychází z mechaniky lomu a jde v podstatě o materiálovou charakteristiku, pomocí které je možné počítat únosnost součásti s trhlinou. Z praktického hlediska lze houževnatost charakterizovat jako schopnost materiálu absorbovat energii před porušením neboli před dosažením určitého mezního stavu. Proto druh lomu podle energetické závislosti rozdělujeme na houževnatý a křehký. Při rychlém zatěžování rázy je většina materiálů schopna absorbovat méně energie než při pomalém zatěžování. S rostoucí rychlostí zatěžování se materiál stává křehkým. Vznik křehkého lomu závisí na mnoha faktorech. Nejvýznamnějšími jsou nízká teplota, rychlost zatěžování, tloušťka materiálu, výskyt vrubu či vad, ale i jakost materiálu.

Podstatnou otázkou lomové mechaniky je, jak zabránit křehkému lomu součásti, popř. konstrukce. Můžeme použít dva rozdílné typy řešení. První z nich je **koncepce tranzitních teplot**, která závisí na tranzitním chování materiálu a jeho požadavku, aby konkrétní konstrukce pracovala při teplotách ležících v oblasti nad tranzitní teplotou. Druhá je známá jako **koncepce zabránění iniciaci lomu**, která vychází z oblasti lomové mechaniky a se kterou se budeme v následujících řádcích zabývat [6].

Lomová mechanika nabízí řadu výhod v porovnání s tranzitním přístupem řešení problémů:

- Zahrnuje problematiku těles s trhlínami, kde odpadají problémy s vruby různých tvarů a velikostí. Vrub je využíván pouze pro lokalizaci polohy trhliny ve zkušebním tělese a urychlení procesu jejího vytváření cyklickým zatěžováním.
- Umožňuje přenos výsledků měření mezi zkušebními tělesy a reálnými součástmi různých tvarů, velikostí a tloušťek.
- Umožňuje využití lomové houževnatosti pro dimenzování konstrukčních částí.
- Může být použita tam, kde materiál nevykazuje tranzitní chování a v případech, kdy součásti pracují pod tranzitními teplotami.
- Umožňuje řešit problémy časově závislých operací např. tečení materiálu za vysokých teplot (creep), namáhání cyklickým zatížením (únava), šíření trhlín při únavě, korozi pod napětím a jejich kombinací [6].

Lomová mechanika sebou nese i řadu nevýhod, zvláště při porovnání s tranzitním přístupem:

- Velké rozměry zkušebních těles, zejména pro zkoušku statické lomové houževnatosti.
- Komplikovaný odběr dostatečného množství materiálu, zejména v případech aktivních součástí či konstrukcí
- Časově náročný proces při tvoření ostré únavové trhliny ve zkušebních tělesech při cyklickém zatěžování.
- Zdlouhavý a složitý ohřev či ochlazení zkušebních těles vzhledem jejich k rozměrům a tloušťkám [6].

## 2.2. Rozdělení lomové mechaniky

Abychom mohli stanovit lomovou houževnatost materiálu, byly zavedeny materiálové charakteristiky a lomová mechanika se rozdělila do dvou hlavních směrů. Lineární elastická lomová mechanika zavedla veličiny  $K_{IC}$  pro napětovou analýzu a  $G_{IC}$  pro energetickou analýzu. Elasto-plastická lomová mechanika zavedla veličiny pro kritické rozevření v kořeni trhliny  $\delta_c$  a kritickou hodnotu J-integrálu  $J_{IC}$ .

### Lineární elastická lomová mechanika (LELM)

Lineární elastická lomová mechanika je nejstarším oborem lomové mechaniky a tvoří základ všech pozdějších lomových teorií. Lineární je proto, že mezi napětím a deformací se předpokládá lineární závislost, tedy platnost Hookeova zákona v oblasti blízko u kořene trhliny. Za určitých předpokladů je LELM schopna popsat napětové deformační poměry u kořene trhliny i při existenci malé plastické zóny. Hlavní metodou výpočtu je koncepce faktoru intenzity napětí  $K$ .

### Elasticko-plastická lomová mechanika (EPLM)

Na rozdíl od LELM nevykazují reálné materiály ve skutečnosti zcela elastické chování, a proto se EPLM používá hlavně u houževnatých materiálů. V oblasti kořene trhliny je jejich porušení doprovázeno vznikem alespoň malé plastické deformace. Čím větší je velikost plastické zóny před kořenem trhliny, tím menší je přesnost výsledků LELM. Jakmile je plastická oblast již hodně velká, je nutno použít metod EPLM. Je založena na energetické bilanci a využívá k tomu hlavně metod křivkového J-integrálu nebo koncepce rozevření trhliny  $\delta_c$  (CTOD – Crack Tip Opening Displacement), případně s využitím J-R křivky.

### 3. Definice základů lineární elastické lomové mechaniky

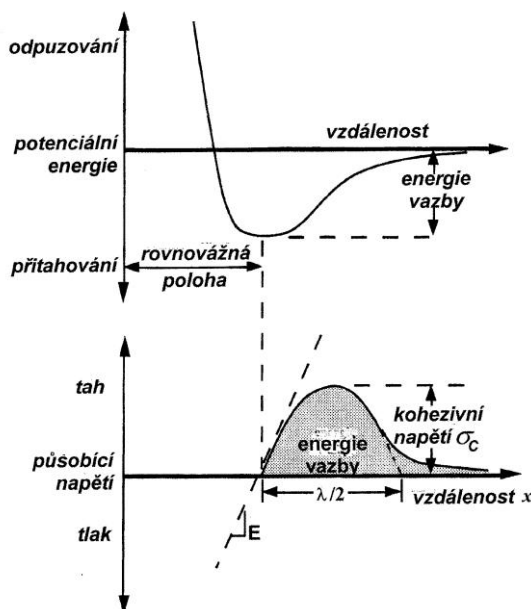
#### 3.1. Napjatost na čele defektu

První důkaz o koncentraci napětí u defektu podal v roce 1913 E.Inglis. Ve své teorii popsal to, že nezáleží jenom na délce defektu, ale i na poloměru čela ostré trhliny ve struktuře materiálu [1].

Největší koncentrace napětí tak vzniká v okolí čela defektu. Při pohledu na lom z atomárního hlediska zjistíme, že při namáhání materiálu s trhlinou či vrubem, mohou být koncentrace napětí větší než kohezní pevnosti sil mezi atomy. Porušením těchto vazeb má za následek rozšíření mikrotrhlin ve struktuře materiálu. Kohezní pevnost je definována rovnicí [2]:

$$\sigma_c = \left( \frac{E \cdot \gamma_s}{a_0} \right)^{1/2} \quad (1)$$

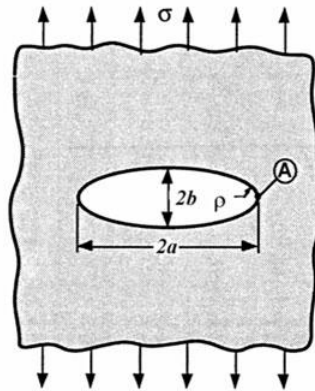
kde  $\gamma_s$  je práce absorbovaná meziatomovými silami při vzniku nového jednotkového povrchu,  $E$  je modul pružnosti a  $a_0$  je mřížkový parametr. Podrobnější odvození rovnice (1) najdeme v [1] nebo [4].



Obr. 3: Pohled na lom z atomárního hlediska [3]

### 3.2. Výpočet pevnosti součásti s trhlinou

Na příkladu podle Inglisovy teorie napětí si lze udělat představu o koncentraci napětí v kritickém místě trhliny eliptického tvaru.



Obr. 4: Eliptický defekt s délkou  $2a$  a výškou  $2b$  [2]

Za předpokladu, že bude šířka  $b$  mnohonásobně menší v porovnání s délkou  $a$ , pak elipsa přejde v ostrou trhlinu s čelem o poloměru  $\rho$ , který je definován jako:

$$\rho = \frac{b^2}{a} \quad (2)$$

Maximální napětí  $\sigma_A$  na čele defektu (bod A) se vypočítá z napětí nominálního,  $a$  je hlavní a  $b$  je vedlejší poloosa eliptické trhliny [1].

$$\sigma_A = \sigma_N + \sigma_N \frac{2a}{b} = \sigma_N \left( 1 + \frac{2a}{b} \right) \quad (3)$$

Při dosazení rovnice (2) do (3) dostaneme závislost napětí na poloměru zakřivení defektu.

$$\sigma_A = \sigma_N \left[ 1 + \left( \frac{a}{\rho} \right)^{1/2} \right] = \sigma_N \left( 1 + \sqrt{\frac{a}{\rho}} \right) \quad (4)$$

Pokud se bude poloměr čela trhliny zmenšovat a bude se přibližovat k nule, bude se maximální napětí zvyšovat až k nekonečnu, potom bude vztah vypadat takto:

$$\sigma_A = 2 \sigma_N \sqrt{\frac{a}{\rho}} \quad (5)$$

Ve skutečnosti ale tento případ nastat nemůže. Znamenalo by to, že součást by se porušila vlivem napětí při velmi malém zatížení. Ze struktury materiálů ale vyplývá, že materiál se díky pohyblivým dislokacím plasticky deformuje. Původní ostrá trhlina se tak může zaoblit. U materiálů, kde nemůže docházet k plastickým deformacím, bude poloměr kořene trhliny roven mřížkovému parametru  $\rho = a_0$ . Zavedením mřížkového parametru do rovnice (5) dostaneme vztah[1]:

$$\sigma_A = 2 \sigma_N \sqrt{\frac{a}{a_0}} \quad (6)$$

K tomu, aby došlo k rozšíření defektu a porušení vazeb mezi atomy, musí napětí dosáhnout kohezní pevnosti. To znamená, že můžeme dosadit do rovnice (6) rovnici (1) a dostaneme vztah pro napětí potřebné k rozšíření defektu v elastické oblasti s ostrou trhlinou [1].

$$\sigma_f = \sqrt{\frac{E \cdot \gamma_s}{4a}} \quad (7)$$

kde  $a$  je velikost defektu,  $\sigma_f$  kritické lomové napětí,  $E$  a  $\gamma_s$  jsou materiálovými charakteristikami.

Materiál	$\sigma_f$ [MPa]	$\gamma_s$ [J.m <sup>-2</sup> ]	$E$ [MPa]	$a$ [mm]
sklo	180	0,21	$6,2 \cdot 10^4$	$2,6 \cdot 10^{-4}$
Zn	1,8	0,8	$3,5 \cdot 10^4$	$5,5 \cdot 10^0$
NaCl	2,2	0,15	$4,9 \cdot 10^4$	$1,0 \cdot 10^0$
Nízkouhlíková ocel	350	2,3	$2,1 \cdot 10^5$	$1,0 \cdot 10^{-3}$

Tab. 1: Charakteristiky při vzniku lomu některých materiálů [4]

### 3.3. Griffithovo energetické kritérium

Griffith jako první modifikoval předchozí teorie vzniku lomu a šíření trhlin tak, že svoji koncepci založil na energetické bilanci namísto klasického pojetí síly a napětí. Vycházel tak z prvního zákona termodynamiky o zachování energie. Z této energetické bilance jsme schopni stanovit rovnovážný stav, čili stav kritické trhliny, kde energie systému zůstává neměnná. Matematicky vypadá vyvození takto [1].

$$W = U + \Delta W_\gamma = W_{el0} - \Delta W_{el} + \Delta W_\gamma \quad (8)$$

$$W = \frac{\sigma \epsilon}{2} - \frac{\sigma_N^2 \pi a^2}{E} + 2 \gamma_s \cdot 2a = \frac{\sigma_N^2}{2E} - \frac{\sigma_N^2 \pi a^2}{E} + 4 \gamma_s a \quad (9)$$

$$\frac{\partial W}{\partial a} = \frac{\partial}{\partial a} \left( \frac{\sigma_N^2}{2E} - \frac{\sigma_N^2 \pi a^2}{E} + 4 \gamma_s a \right) \quad (10)$$

$$0 = 0 - 2 \frac{\sigma_N^2 \pi a}{E} + 4 \gamma_s$$

$$\sigma_N = \sigma_f = \sqrt{\frac{2 \gamma_s E}{\pi a}} \quad (11)$$

Kde  $\sigma_f$  je Griffithova rovnice lomového napětí,  $\Delta W_\gamma$  je povrchová energie potřebná pro vznik nových povrchů,  $W_{el0}$  je energie elastické deformační energie bez trhliny namáhané nominálním napětím,  $\Delta W_{el}$  značí elastickou energii akumulovanou v tělese a uvolněnou rozšířením trhliny o  $\Delta a$ .

Podle Griffithovy teorie se dá předpokládat, že k lomu ideálně křehkého materiálu dojde v případě, že uvolněná elastická energie na špičce trhliny je schopna vyvolat vznik nového povrchu. Tuto teorii šíření trhlin nebylo dlouhou dobu možné aplikovat na kovové materiály, které měly značné plastické chování. To se vyřešilo zavedením předpokladu, že

před růstem defektu dojde v materiálu k nukleaci lomu. Pro plastické chování materiálů se musel Griffithův vztah lomového napětí modifikovat. To se podařilo v roce 1948 G. R. Irwinu s Orowanem [2], kteří sestavili energetický model, jenž zahrnul do výpočtu další energetickou složku  $\gamma_p$ , která znamenala plastickou práci, jenž je dána pohybem dislokací, potřebnou pro vytvoření nové lomové plochy. Modifikovaný výraz měl tedy tvar [2]:

$$\sigma_f = \sqrt{\frac{2E \cdot (\gamma_s + \gamma_p)}{\pi a}} \quad (12)$$

Vztah (12) ovšem můžeme ještě zobecnit. Při šíření trhliny kovovým materiálem může být lomová energie ovlivněna několika dalšími faktory jako například zakřivováním nebo větvením trhliny. To vede k čím dál většímu zvyšování této energie. Vztah tedy upravíme po veškeré typy disipace (pohlcování) energie. V konečné podobě má tvar [2]:

$$\sigma_f = \sqrt{\frac{2E \cdot w_f}{\pi a}} \quad (13)$$

### 3.4. Hnací síla trhliny

Při dalším vývoji řešení konstrukčních problémů bylo dále Griffithovo kritérium upravováno G. R. Irwinem, který roku 1956 zavedl veličinu s označením  $G$  tzv. hnací sílu trhliny s jednotkou [MN/m]. Při vyjadřování energetickými parametry může mít jednotka tvar [MJ/m<sup>2</sup>], kde  $G$  představuje rychlost uvolňování energie [3].

Hnací síla  $G$  připadá levé straně rovnice plynoucí z energetické bilance tělesa s trhlinou a má tak tvar (14) a je vyvozena derivací energie v rovnici (10).

$$G = \frac{\sigma_N^2 \pi a}{E} \quad (14)$$

Pravou stranu rovnice dostaneme rovněž úpravami rovnice (10) derivací složky  $W_\gamma$ . Pravá strana rovnice vyjadřuje podmínku šíření trhliny tj. její kritickou hodnotu, která má tvar [1]:

$$G_c = \frac{\partial W_\gamma}{\partial a} = 2W_f = R \quad (15)$$

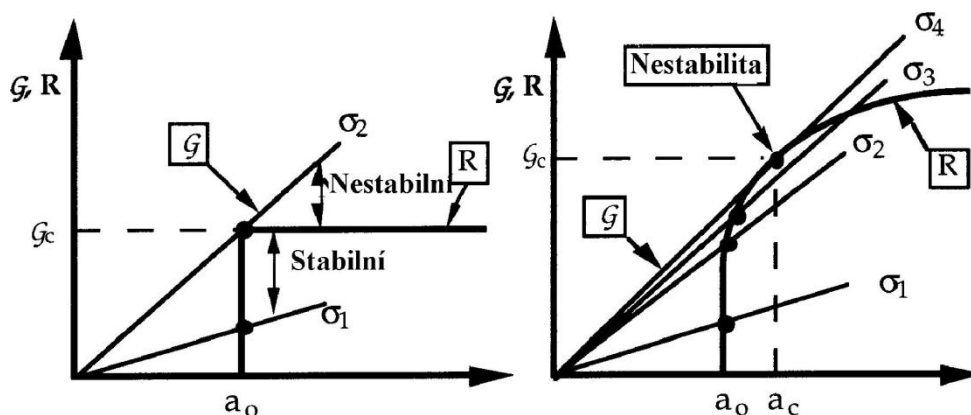
Jde o měřitelnou veličinu a říkáme jí lomová houževnatost materiálu. Při závislosti na délce trhliny ji nazýváme odporem tělesa proti nestabilnímu šíření trhliny a značí se písmenem  $R$ . K lomu tělesa tak dojde, když platí nerovnost  $G \geq G_c$ . Hodnota  $G_c$  je také významná u hodnocení šíření lomu v kovových součástech. Je dokázáno, že měření  $G_c$  nezávisí na podmínkách zatěžování. Definuje mezní hodnotu, při které přechází šíření trhliny ze stavu stabilního do stavu nestabilního [1],[2].

### 3.5. Vznik stabilního a nestabilního lomu

Existují dva způsoby, jak se může trhlina po překročení kritické hodnoty  $G_c$  šířit. Závisí to na tom, jak se mění hnací síla trhliny  $G$  a odpor proti růstu trhliny  $R$  v závislosti na změně velikosti trhliny  $a$ .

- **Stabilní růst** – trhlina se nešíří, pokud neroste zatěžující účinek
- **Nestabilní růst** – trhlina se šíří samovolně, bez nutnosti dalšího zatěžování

Závislost  $R$  na délce trhliny  $a$  se nazývá křivka odporu nebo také R-křivka. Obr.5 znázorňuje R-křivky pro nekonečnou stěnu s centrální trhlinou pro případ nestabilního a stabilního růstu trhliny v křehkém resp. tvárném materiálu [5].



Obr. 5: a) plochá R-křivka pro křehký materiál, b) rostoucí R-křivka pro tvárný materiál [3]

Na obr.5a) lze vidět, že odpor proti růstu trhliny  $R$  je konstantní a není závislý na změně růstu trhliny. Zatěžuje-li se těleso s trhlinou silou odpovídající napětí  $\sigma_1$ , nedojde k zvětšování trhliny, která zůstává stabilní. Platí tak předpoklad  $G < R$ . Naproti tomu, zatížíme-li těleso silou odpovídající napětí  $\sigma_2$ , dosáhne se kritického stavu, což má za následek samovolné šíření trhliny bez potřeb dalšího zatěžování. Šíření lomu je v tomto případě nestabilní, protože hnací síla roste s nárůstem trhliny a odpor  $R$  na délce nezávisí. Splní se tak předpoklad  $G = G_c = R$ . Tento případ je typický pro ideálně křehké materiály. Jistou podobnost má v případech, kdy v oblasti čela trhliny je možno uvažovat o stavu rovinné deformace např. u stěn velkých tloušťek [5].

Z obr.5b) je patrné, že odpor  $R$  má vzrůstající charakter oproti růstu trhliny. Jakmile v tomto případě trhlina poroste, začne se její plastická zóna u jejího čela zvětšovat, což vede k růstu  $R$ . Při větší plasticitě čela trhliny lze v tomto případě uvažovat stav rovinné napjatosti např. u stěn s malými tloušťkami. Při zatížení s napětím  $\sigma_1$  trhlina neporoste. K malému nárůstu trhliny dojde až při napětí  $\sigma_2$  popř.  $\sigma_3$ . Trhlina změní svoji délku o  $\Delta a$  a zastaví se za předpokladu  $G < R$ . Růst trhliny má stabilní charakter. Materiál při tomto zatížení je ještě schopen odolat lomu. Při zatížení napětím  $\sigma_4$  se bude charakter růstu již měnit. Hnací síla je tečná k R-křivce, kde stabilní růst postupně přejde v růst nestabilní při dosažení určité hodnoty nominálního napětí. Vyjádření houževnatosti  $G_c$  však není v tomto případě jednoznačně určeno. Okamžik nestability je závislý jak na průběhu  $R - a$ , tak na průběhu  $G - a$  v důsledku tečnosti přímky s křivkou  $R$  [5].

Pro přehlednost lze podmínky růstu trhliny zapsat matematicky jako:

- **Stabilní šíření trhliny:**  $G = R$ , platí nerovnost  $\frac{\partial G}{\partial a} < \frac{\partial R}{\partial a}$
- **Nestabilní šíření trhliny:**  $G = R$ , platí nerovnost  $\frac{\partial G}{\partial a} \geq \frac{\partial R}{\partial a}$

### 3.6. Faktor intenzity napětí

V roce 1957 G. R. Irwin znovu modifikoval Griffithův model a dal základ dnešní podobě oboru mechaniky lomu [2].

Spolu se svým kolegou Kinzlem zavedli teorii faktoru intenzity napětí, byla definována veličina  $K$  a s ní zavedena i lineární elastická mechanika. Faktor  $K$  je možno vyjádřit z Griffithovy rovnice (11) takto [1]:

$$\sigma_N \cdot \sqrt{\pi a} = \sqrt{2 \gamma_s E} \quad (16)$$

$$\sigma_N \cdot \sqrt{\pi a} = \sqrt{GE}$$

$$\sigma_N \cdot \sqrt{\pi a} = \sqrt{GE} = K \quad (17)$$

Závislost  $G$  na  $K$  lze psát i ve tvaru popsaném v rovnici (18).

$$G = \frac{K^2}{E} \quad (18)$$

G. R. Irwin dále odvodil vztah pro jednoznačnou souvislost mezi veličinami  $G$  a  $K$ , který platí pro průchozí trhlínu v nekonečné stěně pro obecnou konfiguraci tělesa s trhlínou [2].

$$G = \frac{1 - \nu^2}{E} K_I^2 \quad (19)$$

$$\text{za podmínek (RD)} \quad K_I = \sqrt{\frac{GE}{1 - \nu^2}} \quad (20)$$

$$\text{za podmínek (RN)} \quad K_I = \sqrt{GE} \quad (21)$$

kde  $\nu$  symbolizuje Poissonovu konstantu,  $E$  modul pružnosti,  $G$  hnací sílu trhliny a  $K_I$  faktor intenzity napětí.

Co se týče jednotky, faktor intenzity  $K$  musí mít rozměr napětí  $\cdot \sqrt{\text{délka}} \Rightarrow \text{MPa}\sqrt{\text{m}} \Rightarrow \text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \Rightarrow \text{MN} \cdot \text{m}^{-3/2}$ . Je možno se setkat i s rozměrem  $\text{N} \cdot \text{mm}^{-3/2}$ , ovšem zde existuje přepočít, kde  $1 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} = 31,6 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-3/2}$  [3].

Rovnice (19) je významná z hlediska lomové houževnatosti. Podle této rovnice jsme schopni určit hodnoty  $K_{IC}$  a  $G_{IC}$ , díky nimž je možné dále stanovit elastické parametry lomové houževnatosti v EPLM. Z porovnání rovnic (20) a (21) vyplývá, že odolnost vůči lomu bude nižší při rovinné deformaci než při rovinné napjatosti.

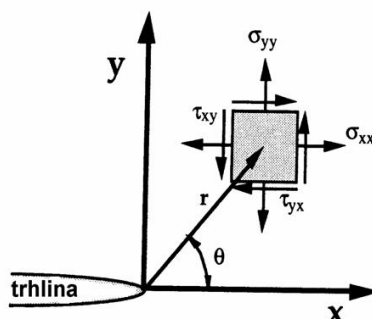
Jakmile byl zaveden a znám faktor intenzity napětí, byly aplikovány základní principy lineární lomové mechaniky i na šíření únavových trhlin. Jako prvním se to povedlo v roce 1960 Paulu C. Parisovi. Dále se lomová mechanika rozvíjela tak, že v roce 1968 J.R. Rice rozšířil analýzu plastické zóny u čela trhliny a zavedl nový výpočet definováním tzv. J-



integrálu, čímž položil základ EPLM. V Dalšíh desetiletích se výzkum a vývoj v oblasti mechaniky lomu těles s trhlinou stále zdokonaloval. Počítačové modelování a využití metody konečných prvků při stanovování faktoru intenzity nyní podává nový náhled na další vyšetřování lomových vlastností materiálu.

### 3.7. Velikost a tvar plastické zóny na čele trhliny

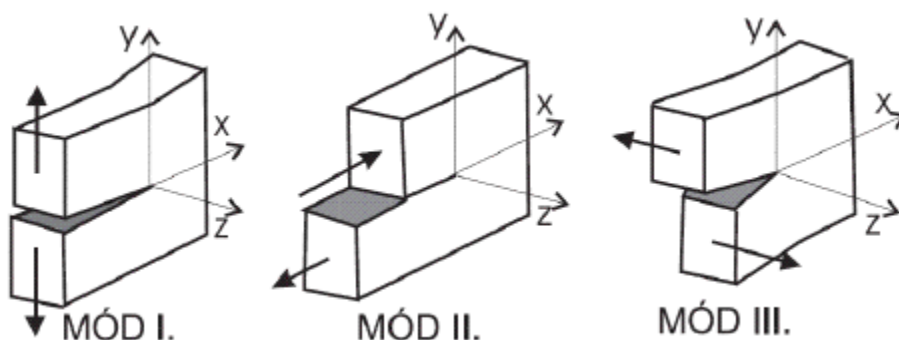
Součinitel neboli faktor intenzity napětí popisuje napjatost v těsné blízkosti okolí trhliny. Napěťové pole před čelem trhliny v lineárně-elastickém materiálu lze psát ve tvaru, jenž popisuje rovnice (22).



$$\sigma_{ij} = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}(\theta) \quad (22)$$

Obr. 6: Napěťová analýza v okolí trhliny [3]

$f_{ij}$  je v tomto případě geometrická funkce závislá na směru zatěžování ve všech třech osách;  $r, \theta$  vyjadřují polární souřadnice, (obr.6) kde  $K$  závisí pouze na typu zatěžování trhliny. Faktor intenzity  $K$  označujeme indexem římskými číslicemi podle druhu (módu) zatěžování, podle toho o jaký jde typ zatížení. Způsoby zatěžování vidíme na obr.7.  $K_I$  vyjadřuje tahový mód (rozevírání),  $K_{II}$  značí smykový mód a  $K_{III}$  mód stříhový [7],[2].



Obr. 7: Jednotlivé módy zatěžování [7]

Mód I se vyskytuje v praxi nejčastěji. V tomto případě lze oblast čela trhliny popsat vztahem:

$$\sigma_{yy} = \sigma_0 = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \quad (23)$$

Hodnota součinitele intenzity  $K$  zde definuje podmínky napjatosti na špici trhliny. Známe-li hodnotu  $K$ , můžeme stanovit jednotlivé složky napětí. Jakmile se poloměr zakřivení čela trhliny přiblíží k nule, tak z teorie elasticity vyplývá, že napětí přímo v kořeni je nekonečně velké, což v reálné podobě nelze uskutečnit. U čela trhliny tak vzniká tzv. singulární oblast. Předpokládáme proto vznik malé plastické zóny ve tvaru kruhu. V tomto místě je maximální napětí omezeno hodnotou meze kluzu  $R_e$ . Vzhledem k rovnováze vnějších a vnitřních sil však musí dojít k přerozdělení napětí (viz *obr.8*), takže skutečný průběh napětí u čela trhliny je jiný než předpokládá elastické řešení. Velikost takovéto plastické zóny lze vyjádřit ve tvaru [1]:

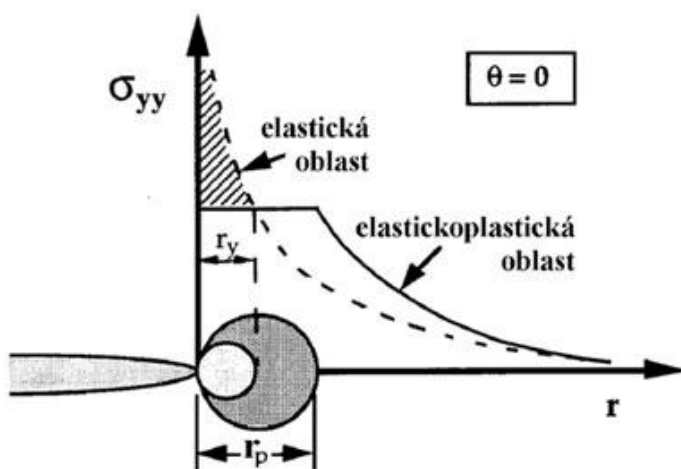
$$r_y = \frac{1}{2\pi} \cdot \left( \frac{K_I}{R_e} \right)^2 \quad (24)$$

Tento vztah lze stanovit v případě elastického řešení, avšak musíme uvažovat i přítomnost napětí elasticko-plastického. V případě elastiko-plastického řešení má plastická zóna větší velikost než v případě elastickém (viz *obr.8*) a má tvar:

$$r_p = \frac{1}{\pi} \cdot \left( \frac{K_I}{R_e} \right)^2 \quad (25)$$

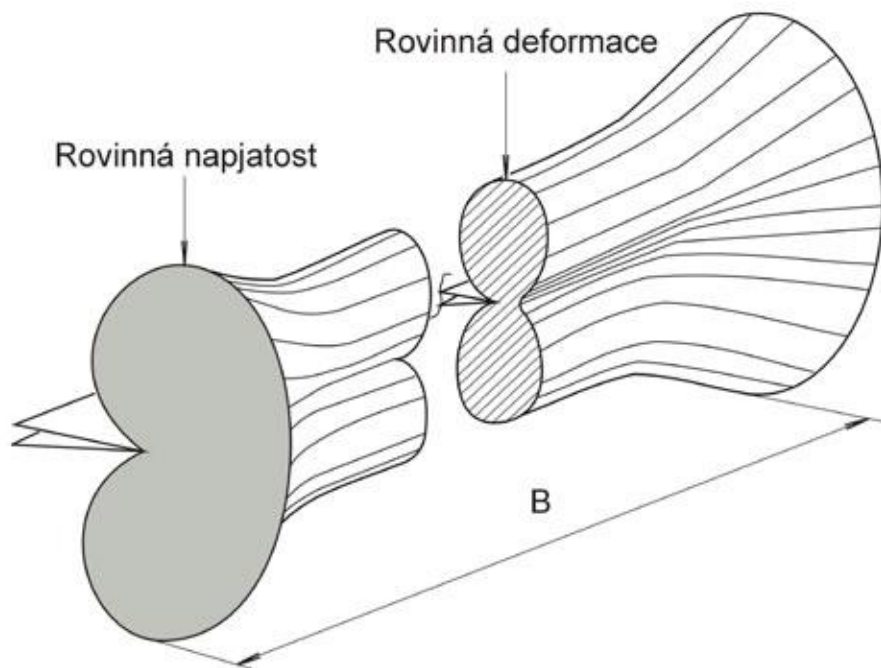
Za předpokladu rovinné deformace má plastická zóna menší velikost a to při potlačení trojosým stavem napjatosti. Toto je popsáno vztahem [1]:

$$r_y = \frac{1}{6\pi} \cdot \left( \frac{K_I}{R_e} \right)^2 \quad (26)$$



Obr. 8: Rozdělení napětí před čelem trhliny v důsledku plastické zóny [3]

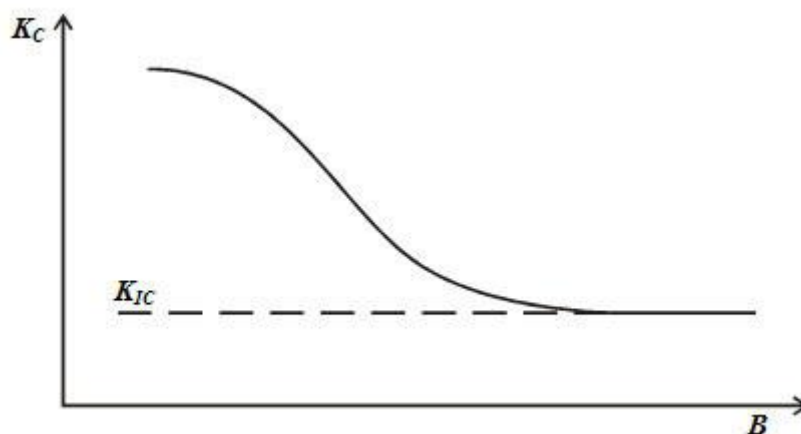
Tvar plastické zóny na čele trhliny pro tahový mód je znázorněn na *obr.9*. Stav napjatosti uvnitř materiálu ovlivňuje oblast plastické deformace na čele trhliny a také náchylnost k porušení křehkým lomem. Důležitým poznatkem v tomto ohledu je fakt, že uvnitř materiálu se stav rovinné deformace mění na stav rovinné napjatosti v závislosti na rozměru tělesa. Lomová houževnatost se tak stanovuje za podmínek rovinné deformace.



Obr. 9: Tvar plastické zóny pro tahový mód [5]

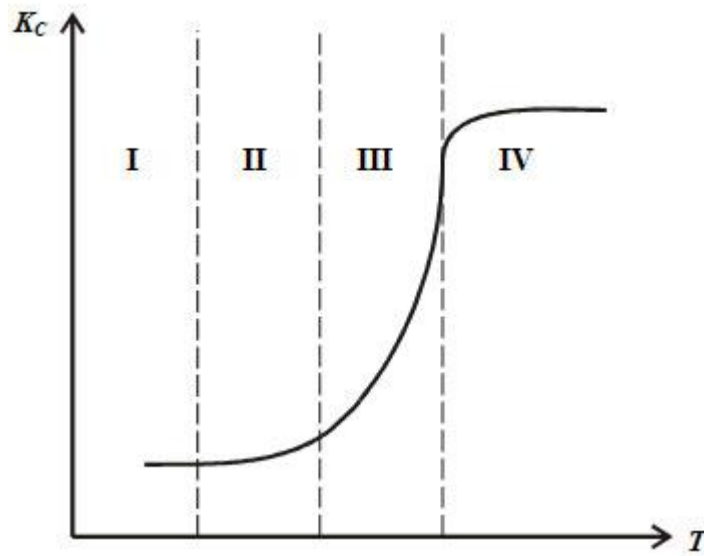
### 3.8. Faktory ovlivňující lomovou houževnatost

**Rozměr tělesa** – Při stanovení lomové houževnatosti se bere nejdůležitější vliv na rozměr resp. tloušťku tělesa. Zvyšujeme-li tloušťku tělesa  $B$ , klesá lomová houževnatost až na hodnotu  $K_{IC}$ , jenž označuje lomovou houževnatost ve stavu RD.



Obr. 10: Závislost lomové houževnatosti  $K_C$  na tloušťce tělesa  $B$

**Teplota** – Kromě vlivu tloušťky má na lomovou houževnatost vliv také teplota. Jak je vidět z obr.11, tak v první fázi hodnota  $K_C$  za nízkých teplot roste pomalu. Druhá fáze stanovuje rychlejší růst hodnoty  $K_C$ , což má za následek vznik křehkého porušení a také prvních náznaků houževnatého porušení struktury materiálu. Ve třetí fázi dochází k prudkému růstu hodnot  $K_C$ . Tato fáze se nazývá také jako tzv. tranzitní oblast. V poslední fázi už hodnoty  $K_C$  takřka nevzrůstají a materiál je zde porušen houževnatě.



Obr. 11: Závislost lomové houževnatosti  $K_C$  na teplotě

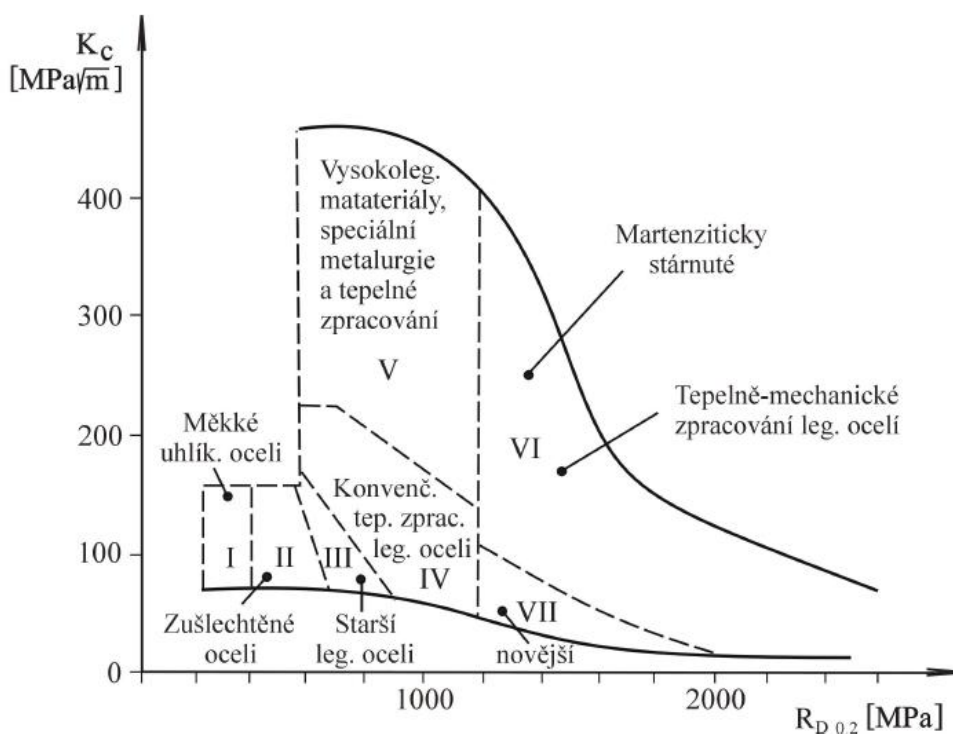
**Rychlost zatěžování** – Je velmi ovlivněna typem zatěžování a tím, zda jde o zatěžování statické nebo dynamické. Jakmile se rychlost zatěžování začne zvyšovat, dojde za předpokladu konstantní teploty k poklesu lomové houževnatosti. Příliš velká rychlost zatěžování má za následek to, že u čela trhliny nedojde k plastické deformaci materiálu.

**Prostředí** – Na hodnotu lomové houževnatosti má vliv i prostředí, ve kterém materiál pracuje. Jde hlavně o agresivní prostředí za přítomnosti radiace.

**Svařování** – Při svařování mohou vznikat v materiálu vnitřní vady či pnutí, což může mít vliv na výslednou lomovou houževnatost materiálu.

**Volba materiálu** – Z obr.12 je zřejmé, že lomová houževnatost jednotlivých druhů materiálu klesá s rostoucí mezí kluzu. Při volbě materiálu má vliv na lomovou houževnatost:

- **Velikost zrna** – Čím je zrno větší, tím je materiál náchylnější k porušení křehkým lomem, díky klesajícímu kritickému lomovému chování.
- **Stárnutí oceli** – Při stárnutí dochází ke zkřehnutí ocelí (hlavně v případě neuklidněných ocelí)
- **Tepelné zpracování** – Jde zejména o žíhání na odstranění vnitřního pnutí a normalizační žíhání
- **Prokalení a povrchové tepelné zpracování**

Obr. 12: Závislost lomové houževnatosti  $K_C$  na mezi kluzu [5]

### 3.9. Platnost lineární elastické lomové mechaniky

Abychom byli schopni stanovit platnost hodnoty lomové houževnatosti, musí být splněny podmínky rovinné deformace a platit tento vztah [1]:

$$B, a, (W - a) \geq 2,5 \cdot \left( \frac{K_{IC}}{R_e} \right)^2 \quad (27)$$

Písmeno  $B$  v tomto případě označuje tloušťku tělesa,  $a$  je délka trhliny,  $(W - a)$  označuje délku neporušeného průřezu před čelem trhliny,  $K_{IC}$  je kritická hodnota součinitele intenzity napětí a  $R_e$  je mez kluzu daného materiálu. Z rovnice (27) vyplývá omezení aplikovatelnosti LELM vzhledem k rozměru tělesa. Zkoušky velkých zkušebních těles jsou vedeny snahou splnit podmínky této rovnice. V případě platnosti této rovnice lze stanovit i poměr poloměru plastické oblasti vzhledem k tloušťce tělesa. Toto se dá vyjádřit následovně [15]:

$$\frac{B}{r_y} = \frac{2,5 \cdot \left( \frac{K_{IC}}{R_e} \right)^2}{\frac{1}{6\pi} \cdot \left( \frac{K_{IC}}{R_e} \right)^2} \cong 50 \quad (28)$$

Toto vyjádření splňuje podmínku lomu součásti při rovinné deformaci a platí zejména u slitin hliníku i u některých druhů ocelí. Lineární elastická lomová mechanika platí v případě, že dojde k lomu při existenci malé plastické zóny. Ta má velikost max. 2% tloušťky tělesa. Jde např. o keramiku, plasty, vysocepevné oceli a běžné konstrukční oceli velkých tloušťek.

## 4. Popis měření lomové houževnatosti za podmínek rovinné deformace

Stanovení lomové houževnatosti při rovinné deformaci kovových materiálů se provádí zkouškami zatěžování zkušebních těles s trhlinou za působení rostoucí síly. Závislost síly na rozevření vrubu se poté graficky zaznamenává, síla odpovídající 2% zdánlivého nárůstu trhliny je určována předepsanou odchylkou od lineární části zkušebního záznamu. Jsou-li splněny podmínky platnosti, je z této síly vypočtena hodnota  $K_{IC}$ .

Při zkoušce lomové houževnatosti za podmínek rovinné deformace nelze předem zaručit, že v průběhu konkrétní zkoušky bude určena platná hodnota  $K_{IC}$  [12].

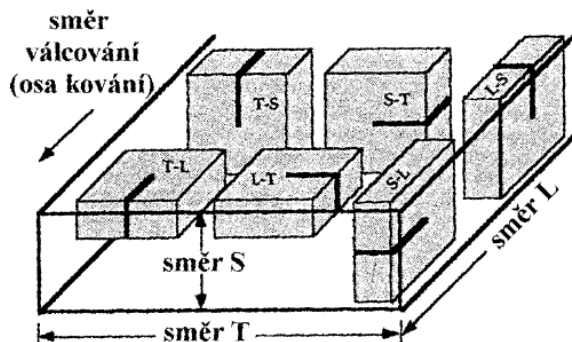
### 4.1. Rozdělení zkoušek lomové houževnatosti

Zkoušky statické lomové houževnatosti - Měření statické lomové houževnatosti při rovinné deformaci se stanovuje dle normy na zkušebních tělesech pro tříbodový ohyb, resp. CT tělesech namáhaných excentrickým tahem. Zkušební tělesa s vrubem mají obvykle větší rozměry a patřičnou minimální tloušťku. Tělesa, která mají stejnou tloušťku jako reálné součásti, mají i skutečný stav RD popř. RN. Oproti například zkouškám rázem v ohybu jsou tyto zkoušky časově i finančně velmi náročné, a aby zajišťovaly platnost, je třeba velkých a speciálně upravených zkušebních těles a přístrojů.

Zkoušky dynamické lomové houževnatosti – Měření dynamické lomové houževnatosti se oproti tomu provádí na menších zkušebních vzorcích s vrubem. Zkoušky se stanovují na Charpyho kladivu, kde je zkušební těleso přeráženo dynamicky se pohybujícím kladivem. Výslednou dynamickou lomovou houževnatost lze stanovit metodou J-integrálu pomocí naměřených veličin jako je např. síla na povrchu kladiva, průhyb zkušebního tělesa či posuv v průběhu lomu vzorku.

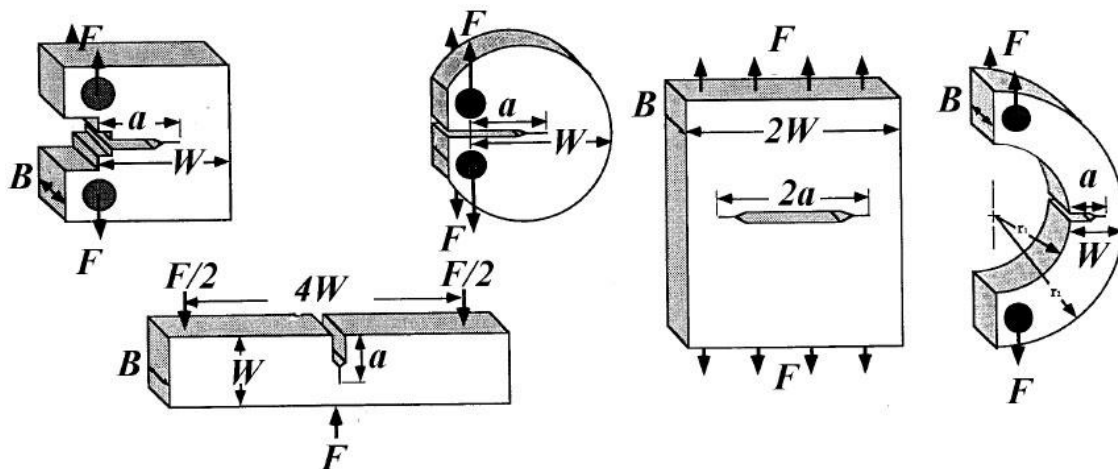
### 4.2. Velikost a tvar zkušebních těles

**Orientace roviny trhliny** – při výběru zkušebního tělesa je nutno zvolit vhodnou orientaci a směr šíření trhliny ve vztahu k hlavním směrům zpracování kovu a protažení zrn. Orientace roviny trhliny musí být stanovena před výrobou zkušebního tělesa, označena v souladu s předepsaným souřadným systémem a zaznamenána. Značení se stanovuje tak, že první písmeno před pomlčkou značí kolmý směr na rovinu trhliny. Druhé písmeno za pomlčkou znamená předpokládaný směr šíření trhliny. Směr hlavní deformace se značí písmenem L, směr nejmenší deformace písmenem T a směr kolmý na rovinu L-T značí písmeno S [12].



Obr. 13: Základní značení roviny trhliny[3]

**Typy a tvary zkušebních těles** – Kromě dvou nepoužívanějších zkušebních těles CT a SENB se v praxi využívají ještě další typy. Jde o tělesa s označením DENT, SENT a CCT (viz obr.14)



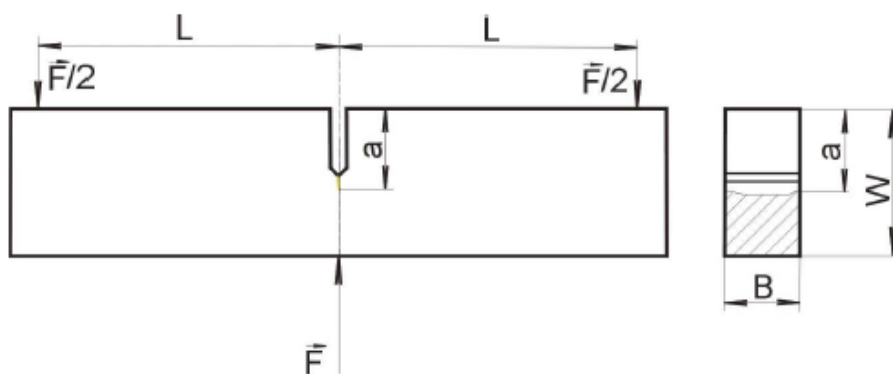
Obr. 14: Typy zkušebních těles pro zkoušky lomové houževnatosti [2]

#### 4.3. Zkušební těleso pro zkoušku ohybem

Nejpoužívanějším zkušebním tělesem pro zkoušku tříbodovým ohybem je těleso typu SENB (single edge notched beam). To je při zkoušce zajištěno dvěma podporami ve tvaru válečků, jejichž vzdálenost je rovna čtyřnásobku šířky zkušebního tělesa ( $W$ ). Obecné rozměry tvaru tohoto zkušebního tělesa jsou uvedeny na obr.15. Podpory vzorku musí být vyrobeny tak, aby se minimalizovaly účinky tření tím, že umožní rotaci a posuv válečků v průběhu ohybu zkušebního tělesa, takže je dosaženo valivého kontaktu mezi plochami vzorku. Samotný postup zkoušky je takový, že se podpory vyrovnají do společné osy a změří se jejich vzdálenost. Zkušební těleso se umístí tak, aby kořen trhliny ležel uprostřed mezi středy válečků a vzdálenosti podpor, kde se dále vyrovná kolmo k válečkům s přesností dle normy.

Typické rozměry:

W	50 mm
B	25 mm
a	25 mm
L	250 mm

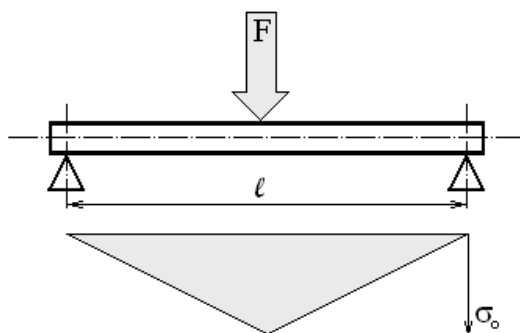


Obr. 15: Zkušební SENB těleso pro zkoušku ohybem [5]

Výhodou tohoto zkušebního tělesa je nenáročná a jednoduchá výroba, naopak nevýhodou je vysoká spotřeba materiálu.

Při zkoušce ohybem u měření lomové houževnatosti lze zkušební těleso zatěžovat dvěma typy zatěžování. Jde o tříbodový a čtyřbodový ohyb.

**Tříbodový ohyb** - Zkoušku tříbodovým ohybem je možno stanovit na přístroji, kde je zkušební těleso namáháno primárně na ohyb. Zkušební vzorek zde působí jako tzv. nosník, který je podepřen dvěma podporami a zatěžován konstantní rychlostí silou, která působí uprostřed mezi vzdálenostmi obou podpor do té doby, dokud nenastane lom zkušebního tělesa. Měří se tak zde vzniklý průhyb tělesa a síla, která jej zatěhuje. Ve výsledku je pak určena počáteční a protlačená délka trhliny. Jestliže dojde k lomu, lze stanovit hodnotu lomové houževnatosti.



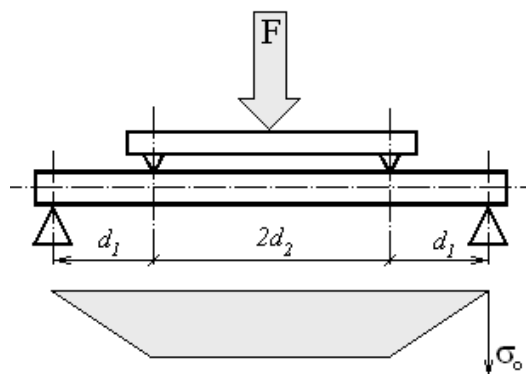
Obr. 16: Průběh ohybového momentu při zkoušce tříbodovým ohybem [10]



Obr. 17: Zkušební vzorek namáhaný tříbodovým ohybem na zkušebním stroji firmy Zwick/Roell [18]

**Čtyřbodový ohyb** - Při této zkoušce je zkušební vzorek namáhán dvěma silami, jejichž zatěžující účinek působí v jedné třetině vzdálenosti dvou podpor. Ohybové napětí je tak rozloženo na dané délce povrchu vzorku, která je rovna vzdálenosti zatěžovacích sil. Výskyt vhodně orientovaného defektu je tak větší, což má za následek menší ohybové napětí. Díky tomu je tento typ častěji využíván pro měření křehkých materiálů.





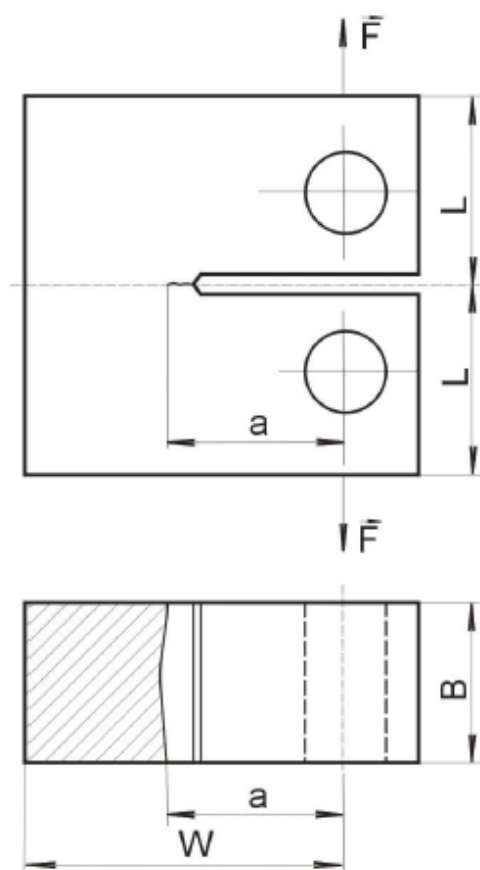
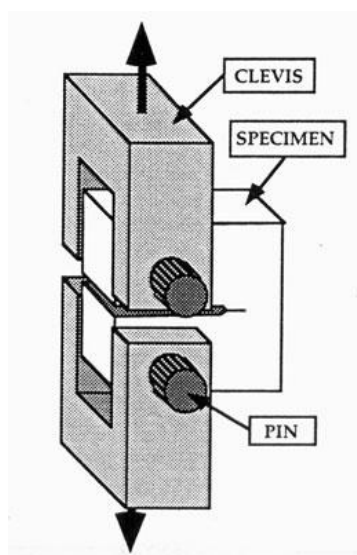
Obr. 18: Průběh ohybového momentu při zkoušce čtyřbodovým ohybem [10]

#### 4.4. Zkušební těleso pro zkoušku excentrickým tahem

Nejpoužívanějším zkušebním tělesem pro zkoušku excentrickým tahem je naopak těleso typu CT (compact tension). Těleso je upnuto na přístroji pomocí upínacích přípravků. Oba konce tělesa jsou upevněny v zátěžném třmenu a zatěžovány prostřednictvím čepů, jenž umožňují rotaci tělesa během zkoušky. Otvory ve třmenech jsou konstruovány s malou ploškou na zátěžných plochách, takže je dosaženo valivého kontaktu a tím minimalizovány účinky tření.

Typické rozměry:

W	50 mm
B	25 mm
a	25 mm
L	65 mm



Obr. 19: Zkušební CT těleso pro zkoušku excentrickým tahem [2],[5]  
Překlad: clevis-třmen, specimen-vzorek, pin-čep

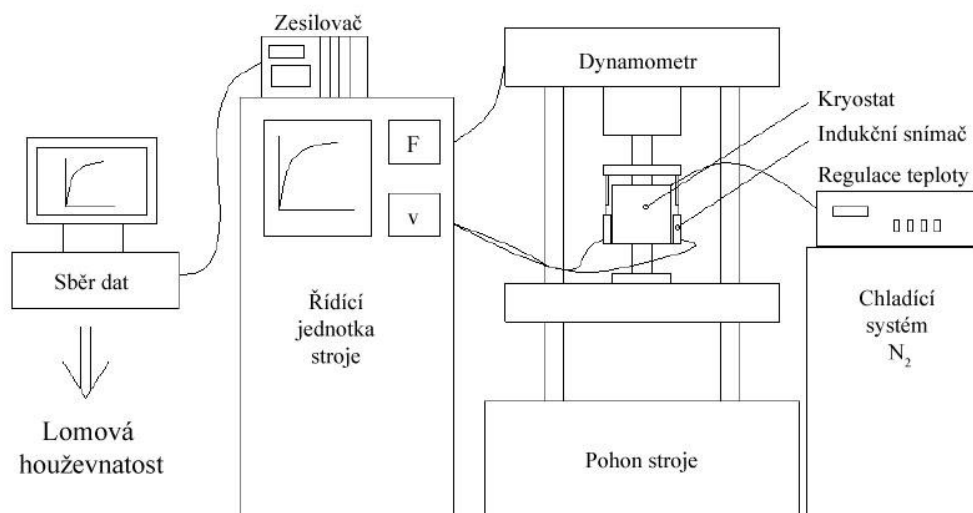
Mezi výhody tohoto zkušební tělesa patří větší úspora materiálu. Mezi hlavní nevýhody patří složitější a dražší výroba.



Obr. 20: Zkušební vzorek namáhaný excentrickým tahem [18]

#### 4.5. Zkušební zařízení

Zkušební stroj pro měření lomové houževnatosti musí splňovat normu ISO a patřičný stupeň přesnosti. Musí být vybaven možností automatického záznamu síly působící na zkušební těleso, většinou se používá počítačový systém sběru dat pro záznam síly a rozevření. Snímání síly je prováděno siloměrem (dynamometrem). Snímače rozevření musí zajišťovat relativní posunutí dvou přesně umístěných měřících bodů překlenujících ústí vrubu. Většinou se používá snímače COD nebo indukčního snímače průhybu. Upínací přípravky pro zkoušku ohybem musí minimalizovat účiny tření tak, že umožní rotaci válečků v podporách a současně dovolují jejich mírný posuv v průběhu zatěžování vzorku. Pro zkoušky tahem se využívá k upínání vzorků zátěžový třmen. Teplota zkušebního tělesa musí být řízena a zaznamenána tak, že termočlánek nebo platinový odporový teploměr bude v kontaktu s povrchem vzorku v těsné blízkosti od čela trhliny. Pohon stroje se zajišťuje buď elektromechanicky, nebo hydraulicky (viz *obr.21*) [12].



Obr. 21: Obecné schéma zkušebního zařízení pro měření lomové houževnatosti [15]

Na Obr.22 vidíme příklad trhacího stroje Zwick Z150, který slouží k základním mechanickým zkouškám kovových a nekovových materiálů. Umožňuje statické zkoušky tahem, tlakem, třibodovým ohybem a zkoušky lomové houževnatosti na CT tělesech. Maximální zatížení je až 150kN. Naměřené hodnoty jak ze snímače rozevření pro zkoušku lomové houževnatosti, tak i ze snímačů prodloužení a příčného zúžení pro tahovou zkoušku vyhodnocuje automaticky profesionální software. Zkušební stroj je vybaven i teplotní komorou, díky které je možné provádět tyto zkoušky v rozmezí teplot od -80°C do 250°C [19].



Obr. 22: Trhací stroj Zwick Z150 [19]

Dalším typem zkušebního zařízení pro zkoušky mechanických vlastností kovových materiálů, na kterém lze provádět zkoušky lomové houževnatosti je typ řady CMT5000. Maximální zatížení dosahuje hodnot až 600kN, což umožňuje použití vzorků velkých rozměrů a hmotností. Zkušební stroj může být vybaven i teplotní komorou (viz *obr.23*) pro zkoušky za vysokých či nízkých teplot.



*Obr. 23: Elektromechanický univerzální testovací stroj SANS CMT5105 [20]*

#### 4.6. Výpočet a vyhodnocení zkoušky

Vyhodnocení zkoušky lomové houževnatosti za podmínek rovinné deformace spočívá v zaznamenání závislosti síly  $F$  na posuvu  $q$ , nebo závislosti síly  $F$  na rozevření vrubu zkušební vzorku  $V$ . Při výpočtu faktoru intenzity  $K_I$  vyjdem z rovnice [2]:

$$K_I = \frac{F_f}{B \cdot \sqrt{W}} g_i \left( \frac{a}{W} \right) \quad (29)$$

Hodnota  $F_f$  označuje sílu působící na zkušební těleso,  $g_i \left( \frac{a}{W} \right)$  je tvarový faktor intenzity napětí,  $B$  a  $W$  označují rozměry zkušební vzorku.

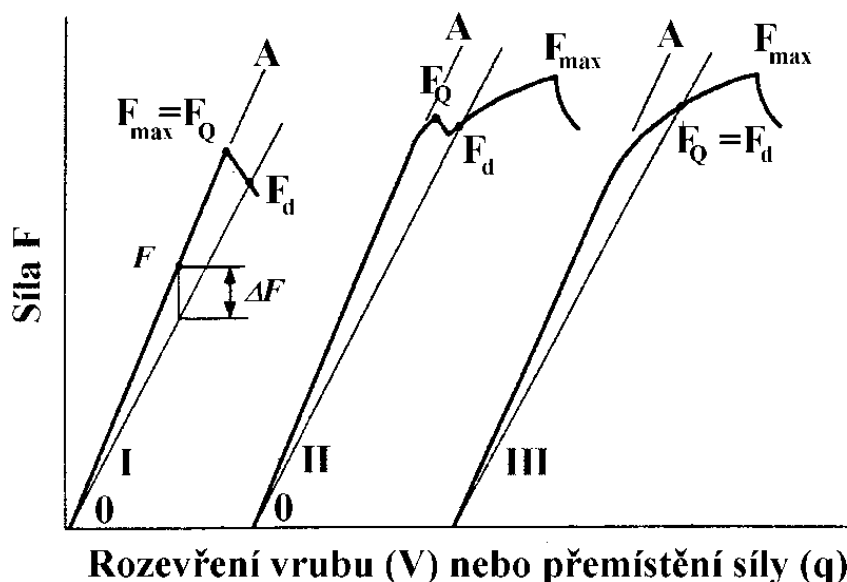
Na zkušebních tělesech se nejprve vytvoří vrub, jenž umožňuje lokalizaci únavové trhliny. Tato trhlina se následně vytvoří v oblasti kořene vrubu cyklováním na únavových strojích nebo podobných zařízeních. Dle normy musí platit, že plastická oblast vytvořená při cyklování u čela trhliny musí být menší než tato oblast v okamžiku iniciace lomu. To je splněno za předpokladu nerovnosti  $K_{fmax} \leq K_{ICO}$ , kde veličina  $K_{fmax}$  je faktor intenzity napětí při maximální síle cyklování a  $K_{ICO}$  je odhadovaná hodnota lomové houževnatosti.

Při vyhodnocení záznamu je nutné stanovit provizorní hodnotu lomové houževnatosti  $K_Q$ , kterou dostaneme při dosazení zatěžovací síly  $F_Q$  do rovnice (29). Rovnice pak má tvar [2]:

$$K_Q = \frac{F_Q}{B \cdot \sqrt{W}} g_i \left( \frac{a}{W} \right) \quad (30)$$

Sílu  $F_Q$  dostaneme ze závislostí, jenž vidíme na obr.20, které sestojíme tak, že lineární část záznamu proložíme první přímkou, dále počátkem vedeme druhou přímku se sklonem o 5% (pro zkušební vzorek typu CT) popř. 4% (pro zkušební vzorek typu SENB) menší než první přímkou. Síla  $F_d$  v záznamu odpovídá průsečíku 5% případně 4% přímky se záznamem. Síla  $F_{max}$  je dále nejvyšší dosažená síla při této zkoušce. Výsledkem je pak ta síla, která v rozmezí dvou lineárních přímek dosáhne svého maxima. Poté je nutno změřit délku trhliny vzniklou během celé zkoušky a spolu s rozměry zkušebního tělesa dosadit do rovnice (30), z čehož zjistíme hledanou hodnotu  $K_Q$ .

Při tom je nutno dodržovat geometrické podmínky jako např. dodržení tolerancí rozměrů, dodržení tvaru, hloubky a rovinnosti trhliny. Dále je nutno dodržovat podmínky kladené na zkušební zařízení jako např. kalibrace nebo dostatečnou přesnost měření.



Poznámka -  $\Delta F/F$  je větší než ve skutečnosti pro lepší názornost

Obr. 24: Typické záznamy pro závislost sílu-posuv [16]

Aby byla tato hodnota  $K_Q$  platná, a mohli jsme ji považovat za hodnotu lomové houževnatosti  $K_{IC}$ , musí splňovat následující tři podmínky [2]:

- $B, a, (W - a) \geq 2,5 \cdot \left( \frac{K_Q}{R_e} \right)^2$
- $\frac{F_{max}}{F_Q} \leq 1,1$
- $K_f \leq 0,6 \cdot K_Q \frac{(R_e)_{t-cyklování}}{(R_e)_{t-zkoušky}}$

Pokud jsou tyto tři podmínky splněny, potom je  $K_Q$  rovno  $K_{IC}$  a jde o hodnotu lomové houževnatosti za předpokladu lineární elastické lomové mechaniky. V opačném případě, nejsou-li tyto podmínky splněny, zkouška není platnou zkouškou  $K_{IC}$  a musí se přejít k elasto-plastické lomové mechanice a jiné metodě řešení problému.

## 5. Závěr

V dnešní době se můžeme setkat s celou řadou mechanických zkoušek, díky kterým je možné měřit a hodnotit houževnatost materiálu. Těchto zkoušek je zapotřebí z hlediska existence celé řady případů, kdy je potřeba hodnotit materiál z hlediska odolnosti proti křehkému porušení. Toho je možné docílit metodami lomové mechaniky, která se dělí na lineární elastickou a elasticko-plastickou lomovou mechaniku. Pomocí těchto dvou oborů tak lze stanovit hodnotu lomové houževnatosti materiálu, případně celých konstrukcí.

Cílem této práce bylo zpracování poznatků o lomové houževnatosti kovových materiálů a základů lineární elastické lomové mechaniky. Byly popsány výpočty pevnosti součásti s trhlinou a definovány souvislosti mezi energetickými a napětovými kritérii z nichž vyplývá, že lomová houževnatost se stanovuje za podmínek rovinné deformace, kdy stav napjatosti ovlivňuje oblast plastické deformace na čele trhliny a náchylnost ke křehkému porušení. Stanovení hodnoty lomové houževnatosti vede zcela jasně ke zkouškám těles větších rozměrů a tloušťek. K tomu je zapotřebí potřebného množství materiálu pro zkušební tělesa a velmi drahé elektrohydraulické zkušební přístroje. Zkoušky velkých zkušebních těles tak mají své využití v případech velkých silnostěnných součástí vyrobených z houževnatých materiálů. Jsou to například tlakové nádoby u jaderných reaktorů, turbogenerátory či rotory parních turbín apod.

## 6. Seznam použitých symbolů

$\sigma$	[MPa]	Napětí
$\sigma_f$	[MPa]	Kritické lomové napětí
$\varepsilon$	[%]	Poměrná deformace
$\nu$	[-]	Poissonova konstanta
$\delta_c$	[mm]	Lomová houževnatost určená z koncepce rozevření trhliny
$\gamma_s$	[J.m <sup>-2</sup> ]	Práce potřebná k vytvoření lomové plochy
$a$	[mm]	Délka trhliny
$a_0$	[mm]	Počáteční délka trhliny
$b$	[mm]	Šířka trhliny
$B$	[mm]	Tloušťka zkušebního tělesa
$E$	[MPa]	Youngův modul pružnosti
$F$	[N]	Síla
$G$	[N.m <sup>-1</sup> ]	Hnací síla trhliny
$G_C$	[KJ.m <sup>-2</sup> ]	Lomová houževnatost
$g_i$	[-]	Tvarový součinitel
$J_{IC}$	[KJ.m <sup>-2</sup> ]	Lomová houževnatost určená z J-integrálu
$K$	[MPa.m <sup>1/2</sup> ]	Faktor intenzity napětí
$K_C$	[MPa.m <sup>1/2</sup> ]	Kritická hodnota faktoru intenzity napětí při lomu
$K_{IC}$	[MPa.m <sup>1/2</sup> ]	Lomová houževnatost určená za podmínek rovinné deformace
$K_Q$	[MPa.m <sup>1/2</sup> ]	Provizorní hodnota lomové houževnatosti
$K_{fmax}$	[MPa.m <sup>1/2</sup> ]	Faktor intenzity napětí při maximální síle cyklování
$K_{ICO}$	[MPa.m <sup>1/2</sup> ]	Odhadovaná hodnota lomové houževnatosti
$R_m$	[MPa]	Mez pevnosti
$R_e$	[MPa]	Mez kluzu
$R_{p0,2}$	[MPa]	Smluvní mez kluzu
$r$	[mm]	Poloměr zakřivení na čele trhliny
$V$	[mm]	Rozevření vrubu
$W$	[mm]	Šířka zkušebního tělesa
$w$	[J]	Energie napjatosti
$w_\gamma$	[J]	Povrchová energie
$w_{el}$	[J]	Elastická energie

## 7. Použitá literatura

- [1] VELES, P.: *Mechanické vlastnosti a skúšanie kovov*: celoštátna vysokoškolská učebnica pre hutnícke a strojárské fakulty vysokých škôl. 2. vyd. Bratislava: Alfa, 1989. 401 s.
- [2] ANDERSON T.L.: *Fracture mechanics, Fundamentals and Applications*, CRC Press, 688s, 1995
- [3] VLACH, R.: *Základy lomové mechaniky*, VUT FSI, Ústav Materiálových Věd a Inženýrství, 13 s. [online], Dostupné z WWW: <<http://ime.fme.vutbr.cz/files/vyuka/GS0/06%20-%20Lomova%20mechanika.doc>>.
- [4] PUŠKÁR, A.: *Medzné stavy materiálov a súčastí*: celoštátna vysokoškolská príručka pre strojárské a stavebné fakulty vysokých škôl. 1. vyd. Bratislava: Veda, 1989. 299 s.
- [5] VLK M., FLORIAN Z.: *Mezní stavy a spolehlivost*, VUT Brno, 2007, 235s.
- [6] MENTL, V.: *Degradační procesy a životnost: problematika křehkého lomu*, přednáška, ZČU-Plzeň, 2008
- [7] NÁHLÍK, L.; HUTAŘ, P.: *Únava a lomová mechanika : Základy lomové mechaniky*, prezentace [online], 2007 [cit. 2011-03-02]. Dostupné z WWW: <[http://www.student.chytrak.cz/unava/08%20zaklady\\_LM.pdf](http://www.student.chytrak.cz/unava/08%20zaklady_LM.pdf)>.
- [8] NÁHLÍK, L.; HUTAŘ, P.: *Únava a lomová mechanika : Křehký lom*, prezentace [online], 2007 [cit. 2011-03-02]. Dostupné z WWW: <[http://www.student.chytrak.cz/unava/11%20krehky\\_lom.pdf](http://www.student.chytrak.cz/unava/11%20krehky_lom.pdf)>.
- [9] NĚMEC, K.: *Mezní stavy materiálů*. [online]. VUT FSI, Ústav Materiálových Věd a Inženýrství, 2008 [cit. 2011-04-01]. Dostupné z WWW: <[http://ime.fme.vutbr.cz/files/vyuka/GS0-K/01a\\_MS6K.ppt](http://ime.fme.vutbr.cz/files/vyuka/GS0-K/01a_MS6K.ppt)>.
- [10] *Keramika*. [online]. VUT FSI, Ústav Materiálových Věd a Inženýrství, 2008 [cit. 2011-01-26]. Dostupné z WWW: <<http://ime.fme.vutbr.cz/files/vyuka/GS0/12%20-%20keramika.ppt>>.
- [11] MOLLIKOVÁ E., KALÁB P., STRÁNSKÝ L., SEDLÁČEK J.: *Zkouška rázem v ohybu*. [online]. VUT FSI, Ústav Materiálových Věd a Inženýrství, 2006 [cit. 2011-03-09]. Dostupné z WWW: <<http://drogo.fme.vutbr.cz/opory/pdf/umvi/zk.raz.ohybu.pdf>>.
- [12] ČSN EN ISO 12737. *Kovové materiály - Stanovení lomové houževnatosti při rovinné deformaci*. Praha: ČNI, 2006. 20 s.
- [13] PODHORA, Jiří.: *Mechanické zkoušky na materiálech výrobků provozovaných za nízkých a vysokých teplot*. Portál Tlakinfo.cz [online]. 2008, [cit. 2011-04-02]. Dostupné z WWW: <<http://www.tlakinfo.cz/t.py?t=2&i=1620>>.
- [14] Kunz, J.: *Aplikovaná lomová mechanika*. 4. přeprac. vyd. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2005, 1991. 272 s. ISBN: 80-01-03306-6
- [15] CHLUP, Z.: *Lomová houževnatost : Zkoušení materiálu*, prezentace [online]. ÚFM AVČR, 2010 [cit. 2011-01-15]. Dostupné z WWW: <[http://www.ipm.cz/group/fracture/vyuka/doc/Lomova\\_houzevnatost\\_ZM\\_ZCH.pdf](http://www.ipm.cz/group/fracture/vyuka/doc/Lomova_houzevnatost_ZM_ZCH.pdf)>.



[16] VLACH, R.: *Elasto-plastická lomová mechanika a měření lomové houževnatosti*, VUT FSI, Ústav Materiálových Věd a Inženýrství, 7 s. [online], Dostupné z WWW: <<http://ime.fme.vutbr.cz/files/vyuka/GS0/07%20-%20Mereni%20-%20LM.doc>>.

[17] *Century of Flight, De Havilland Comet* [online]. 2005, Dostupné z WWW: <<http://www.century-of-flight.net/Aviation%20history/coming%20of%20age/De%20Havilland%20Comet.htm>>.

[18] Zwick/Roell: *Testing Machines and Systems for Metal, Testing systems* [online]. 2010 [cit. 2011-04-29]. Dostupné z WWW: <<http://pdf.directindustry.com/pdf/zwick/testing-machines-and-systems-for-metals/15660-3704.html>>.

[19] SIMD: Structural Integrity & Materials Design, *Trhací stroj ZWICK ZI50* [online]. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava: 2010 [cit. 2011-04-30]. Dostupné z WWW: <[http://www.simd.cz/index.php?option=com\\_content&task=view&id=89&Itemid=80](http://www.simd.cz/index.php?option=com_content&task=view&id=89&Itemid=80)>.

[20] SANS Group Company: *Electromechanical Universal Testing Machine: CMT5000 series* [online]. 2006 [cit. 2011-04-30]. Dostupné z WWW: <<http://www.sans.cn/ProductHtml/20071583558229.html>>.